

# PTFE kopásállóságának növelése részecske adalékanyagokkal – review

Tóth Levente Ferenc<sup>1,2</sup>, Szabó Gábor<sup>1</sup>, Patrick De Baets<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (BME), Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika Tanszék

<sup>2</sup>Member of Flanders Make, the strategic research center for the manufacturing industry, Belgium

*Napjainkban számos kutatás jelenik meg a poli(tetrafluor-etilén) (PTFE) kopásállóságának növelésével kapcsolatban. A mikro- és nanorészecskék nagymértékben képesek a kopás sebességét csökkenteni, amennyiben a kopástáskor lejátszódó tribokémiai folyamatokat figyelembe véve választunk adalékanyagokat. Összefoglaló cikkünkben a tématerület friss kutatási eredményeit és trendjeit tekintjük át.*

## 1. BEVEZETÉS

A poli(tetrafluor-etilén) (PTFE) a hőre lágyuló polimerek közül az egyik legelterjedtebben felhasznált és vizsgált alapanyag/adalékanyag a tribológia területén. 1938-ban fedezte fel Dr. Roy J. Plunkett a CHEMOURS munkatársaként, amit a cég 1945-ben saját márkanévvel látott el, ez a név a jól ismert *teflon*. Tribológiai alkalmazásával kapcsolatban pedig már az 1950-es évektől is elérhető kutatások. Azóta számos alkatrészben lelhető fel alap- vagy adalékanyagként (szilárd kenőanyagként), úgymint gördülő- és siklócsapágyakban, fogaskerekekben, dugattyú megvezetésekben, tömítésekben, membránokban, de az orvostechnikai vagy konyhai alkalmazásokban is ismertté vált. Felhasználása történhet alapanyagként, vagy kompozit esetében mátrixanyagként, illetve adalékként por és szál formájában, valamint számos termék külső bevonatként jelenik meg. Több olyan kutatást is publikáltak, amelyekben PTFE nanorészecskéket kenőolajokhoz adnak hozzá, csökkentve ezzel a kialakuló súrlódási tényezőt és kopási sebességet [1]. Az elért sikerek a kis súrlódási együtthatójának, kémiaiilag stabil természetének, a polimerekhez viszonyított nagy hőstabilitásának, valamint önkenő tulajdonságának köszönhetők [2, 3]. Ezen jellemzők mellett a PTFE más hőre lágyuló polimerekhez hasonlóan kis sűrűségű, korrózióálló és jó csillapítóképességgel rendelkezik. Önkenő tulajdonsága lehetővé teszi olyan tribológiai rendszerek tervezését és üzemeltetését, amelyek nem igényelnek külső kenőanyagot, egyszerűsítve ezzel a kialakított konstrukciót, illetve csökkentve az üzemeltetési költségeket. Felépítését tekintve a részben kristályos polimerek közé sorolható, molekulaláncát szén és fluor atomok alkotják egyszeres kovalens kötással. Kristályossága jelentős mértékben függ a gyártási paraméterektől, kristályossági foka – ahogy kristályos polimerek esetében is – nagyban befolyásolja tribológiai teljesítményét.

Kihívást jelent a meglehetősen kis kopásállósága, illetve a hőre lágyuló polimerekhez viszonyított nehézkes feldolgozhatósága. A kopásállósága adalékanyagok hozzáadásával akár

több nagyságrenddel növelhető a töltetlen PTFE alapanyaghoz képest. Ilyen adalékanyagok lehetnek többek között a bronz, a grafit, a molibdén-diszulfid ( $\text{MoS}_2$ ), a réz, az üvegszál, az alumínium-oxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) vagy a grafén [3–10]. A kereskedelemben kapható, különböző töltött PTFE változatokhoz hasonlítva, a kopásállóság mértéke még további nagyságrendekkel növelhető, ha a kémiai hátteret is figyelembe vevő, tudatos tervezéssel fejlesztünk keverékeket. Ahhoz, hogy ez megvalósuljon, szükséges a koptatás folyamán megjelenő tribo-kémiai reakciók megismerése, amelyek hatással vannak a töltőanyagok és a mátrix közötti adhézióra. Fontos továbbá a koptatás folyamán létrejövő úgynevezett átmeneti réteg (transfer layer, tribofilm) részletes vizsgálata, mivel ezen réteg tulajdonságainak közvetlen hatásai vannak a kopásra és a súrlódási tényezőre. Az említett transfer layer a koptatás folyamán létrejövő, a két érintkező felület közötti átmeneti réteg, amely egy fém-polimer párt példának hozva, a fém felületi érdességét csökkenti a felületi egyenetlenségek kitöltésével. Amennyiben ez az átmeneti réteg megfelelő minőségben és egyenletesen alakul ki a koptatott felületen, egyfajta védőréteggént viselkedve pozitív hatással lehet mind a súrlódásra, mind a kopásállóságra. Polimerek közül az ezen feltételeknek megfelelő átmeneti réteg képződés alapvetően a részben kristályos hőre lágyulóknál valósul meg.

## 2. PTFE KOPÁSÁLLÓSÁGÁNAK NÖVELÉSE MIKRO- ÉS NANORÉSZECSKÉKKEL

Az 1. és 2. táblázatban töltött és töltetlen PTFE minták szakirodalomban is megtalálható tribo-teszt eredményei láthatók. A felhasznált ellendarab minden esetben acél, a méréseket levegő atmoszférában, szobahőmérsékleten, külső kenőanyag nélküli közegben végeztük. Az 1. táblázatban a referencia töltetlen PTFE, illetve a töltött PTFE kompozitok kopási sebesség, illetve a súrlódási tényező értékeit hasonlítjuk össze. A koptatási vizsgálatok beállított paramétereit, illetve konfigurációit a 2. táblázat mutatja be. A bronz, grafit,  $\text{MoS}_2$  és réz részecskék mérete a néhány tíz  $\mu\text{m}$ -es tartományba estek

(1. táblázat). A referenciaként bemutatott üvegszálak átmérője átlagosan 7–10  $\mu\text{m}$ , hosszúságuk pedig minden esetben 50–100  $\mu\text{m}$  közötti [5–7]. A felhasznált  $\text{Al}_2\text{O}_3$  átlagos szemcsemérete 80 nm (1. táblázat, 22–24. sor), illetve 38 nm (1. táblázat,

21. és 25–27. sor). A grafén adalékanyag átlagos szemcsemérete 25  $\mu\text{m}$ , vastagsága 6–8 nm (1. táblázat, 28–32. sor), illetve 2 nm vastagságú néhány  $\mu\text{m}$  átlagos szemcsemérettel (1. táblázat, 33–36. sor). A 22, 23 és 24-es teszt esetében

1. táblázat.

PTFE kompozitok kopási sebességének és súrlódási tényezőjének összehasonlítása száraz (külső kenőanyag nélküli) közegben, levegő atmoszférában, szobahőmérsékleten. A sárgával kiemelt cellák a kopási sebesség legalább 3 nagyságrendbeli javulását, illetve a súrlódási tényező 50% körüli csökkenését jelzik.

Sorszám	Adalékanyag	Koncentráció	Kopási sebesség – PTFE [ $\text{mm}^3/\text{Nm}$ ]	Kopási sebesség – kompozit [ $\text{mm}^3/\text{Nm}$ ]	Súrlódási tényező – PTFE [–]	Súrlódási tényező – kompozit [–]	Irodalom
1	Bronz	40 m/m%	$8,0 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-7}$	0,18	0,13	[6]
2	Bronz	40 m/m%	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$6,0 \cdot 10^{-7}$	0,22	0,29	[7]
3	Grafít	5 V/V%	$7,3 \cdot 10^{-4}$	$5,8 \cdot 10^{-5}$	0,26	0,14	[10]
4	Grafít	10 V/V%	$7,3 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-5}$	0,26	0,17	[10]
5	Grafít	20 V/V%	$7,3 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	0,26	0,18	[10]
6	Grafít	30 V/V%	$7,3 \cdot 10^{-4}$	$8,0 \cdot 10^{-6}$	0,26	0,19	[10]
7	Grafít	15 m/m%	$8,0 \cdot 10^{-4}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$	0,18	0,16	[6]
8	Grafít	15 m/m%	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,0 \cdot 10^{-6}$	0,22	0,22	[7]
9	MoS2	20 m/m%	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	0,22	0,21	[7]
10	Réz	5 V/V%	$7,3 \cdot 10^{-4}$	$4,7 \cdot 10^{-5}$	0,26	0,22	[10]
11	Réz	10 V/V%	$7,3 \cdot 10^{-4}$	$8,0 \cdot 10^{-6}$	0,26	0,24	[10]
12	Réz	20 V/V%	$7,3 \cdot 10^{-4}$	$\sim 1 \cdot 10^{-6}$	0,26	0,20	[10]
13	Réz	30 V/V%	$7,3 \cdot 10^{-4}$	$\sim 1 \cdot 10^{-6}$	0,26	0,20	[10]
14	Üvegszál	15 V/V%	$9,0 \cdot 10^{-4}$	$7,0 \cdot 10^{-4}$	0,12	0,13	[5]
15	Üvegszál	25 V/V%	$9,0 \cdot 10^{-4}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$	0,12	0,13	[5]
16	Üvegszál	25 m/m%	$8,0 \cdot 10^{-4}$	$5,0 \cdot 10^{-7}$	0,18	0,25	[6]
17	Üvegszál	25 m/m%	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	0,22	0,31	[7]
18	Üvegszál	25 m/m%	nincs adat	$1,3 \cdot 10^{-6}$	nincs adat	0,17	[8]
19	Üveggömb	25 m/m%	nincs adat.	$1,2 \cdot 10^{-6}$	nincs adat	0,18	[8]
20	Üveglemezke	25 m/m%	nincs adat	$4,7 \cdot 10^{-6}$	nincs adat	0,18	[8]
21	$\text{Al}_2\text{O}_3$	4 m/m%	$4,8 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-5}$	0,16	0,21	[9]
22*	$\text{Al}_2\text{O}_3$	5 m/m%	$6,3 \cdot 10^{-4}$	$4,4 \cdot 10^{-6}$	0,16	0,19	[3]
23*	$\text{Al}_2\text{O}_3$	5 m/m%	$4,3 \cdot 10^{-4}$	$5,6 \cdot 10^{-7}$	0,12	0,20	[3]
24*	$\text{Al}_2\text{O}_3$	5 m/m%	$4,9 \cdot 10^{-4}$	$2,4 \cdot 10^{-7}$	0,14	0,16	[3]
25	$\text{Al}_2\text{O}_3$	8 m/m%	$4,8 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	0,16	0,19	[9]
26	$\text{Al}_2\text{O}_3$	12 m/m%	$4,8 \cdot 10^{-4}$	$3,0 \cdot 10^{-6}$	0,16	0,18	[9]
27	$\text{Al}_2\text{O}_3$	20 m/m%	$4,8 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	0,16	0,22	[9]
28	Grafén	0,25 V/V%	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$2,7 \cdot 10^{-4}$	0,27	0,23	[11]
29	Grafén	0,75 V/V%	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$2,8 \cdot 10^{-4}$	0,27	0,17	[11]
30	Grafén	1 V/V%	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$2,4 \cdot 10^{-4}$	0,27	0,17	[11]
31	Grafén	2 V/V%	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-5}$	0,27	0,12	[11]
32	Grafén	4 V/V%	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$6,6 \cdot 10^{-6}$	0,27	0,14	[11]
33	Grafén	0,12 m/m%	$4,0 \cdot 10^{-4}$	$4,0 \cdot 10^{-4}$	nincs adat	nincs adat	[4]
34	Grafén	0,32 m/m%	$4,0 \cdot 10^{-4}$	$3,0 \cdot 10^{-5}$	nincs adat	nincs adat	[4]
35	Grafén	5 m/m%	$4,0 \cdot 10^{-4}$	$4,0 \cdot 10^{-7}$	nincs adat	nincs adat	[4]
36	Grafén	10 m/m%	$4,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	nincs adat	nincs adat	[4]

\*A 22, 23 és 24-es teszt esetében rendre 2,5, 35 és 68% a relatív páratartalom [3].

rendre 2,5, 35 és 68% a relatív páratartalom ( $RH\%$ ). A 2. táblázatban közölt pin-on-flat és block-on-ring konfigurációkat az 1. ábra szemlélteti.

A PTFE kopásállósága mikrorészecske adalékanyagok hozzáadásával (például grafit,  $MoS_2$  vagy réz) alapvetően 1–2 nagyságrenddel, míg bronzsal 3 nagyságrendet is növekedett (1. táblázat). Üvegszál esetében Blanchet és társai három

nagyságrendbeli javulásról számolnak be pin-on-disc konfigurációnál. Khedkar és társai ball-on-disc konfiguráció esetében  $10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$  mértékű kopási sebességet állapítanak meg mind a PTFE, mind a PTFE/üvegszál kombinációknál [6]. Klaas és társai  $10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$  nagyságrendű kopási sebességet regisztráltak különböző geometriájú üveg adalékok összehasonlítása során [8], tehát nagyságrendbeli különbség

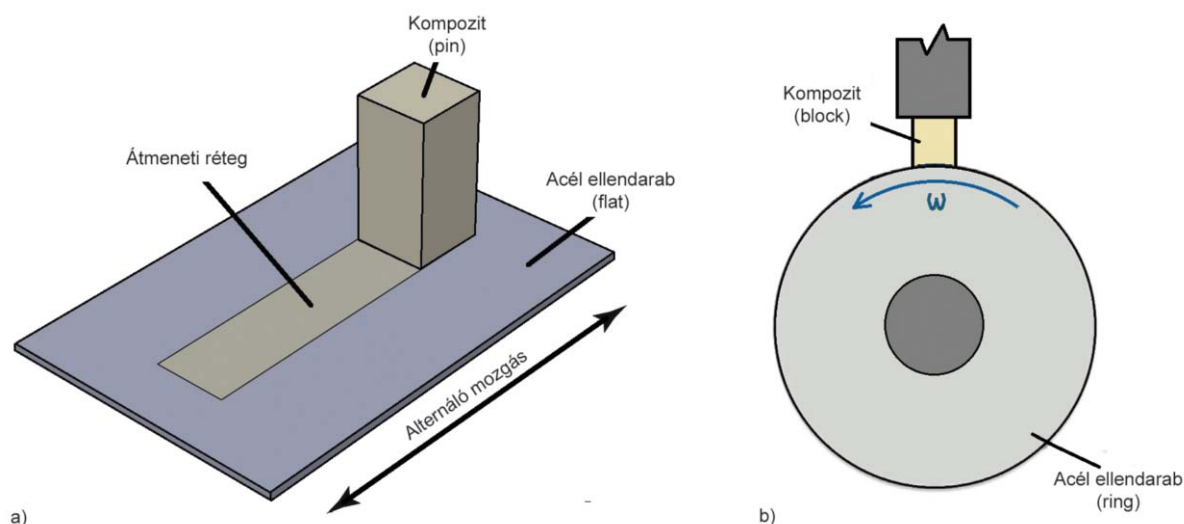
2. táblázat.

PTFE kompozitokon végzett koptatási vizsgálatok (1. táblázat) konfigurációinak és paramétereinek részletezése.

Az alkalmazott pin, illetve block kezdeti súrlódó felülete minden esetben sík volt.

Sorszám	Konfiguráció	Ellendarab	Terhelés	Koptatási sebesség [m/s]	Kopási út – kompozit [m]	Irodalom
1	pin-on-disc	316, disc	6,55 MPa	0,05	nincs adat (folyamatos mozgás)	[6]
2	pin-on-disc	mild steel, disc	1,4 MPa	0,50	nincs adat (folyamatos mozgás)	[7]
3	block-on-ring	1Cr18Ni9Ti, ring	196 N	0,45	1 602 (folyamatos mozgás)	[10]
4	block-on-ring	1Cr18Ni9Ti, ring	196 N	0,45	1 602 (folyamatos mozgás)	[10]
5	block-on-ring	1Cr18Ni9Ti, ring	196 N	0,45	1 602 (folyamatos mozgás)	[10]
6	block-on-ring	1Cr18Ni9Ti, ring	196 N	0,45	1 602 (folyamatos mozgás)	[10]
7	pin-on-disc	316, disc	6,55 MPa	0,05	nincs adat (folyamatos mozgás)	[6]
8	pin-on-disc	mild steel, disc	1,4 MPa	0,50	5 000 (folyamatos mozgás)	[7]
9	pin-on-disc	mild steel, disc	1,4 MPa	0,50	nincs adat (folyamatos mozgás)	[7]
10	block-on-ring	1Cr18Ni9Ti, ring	196 N	0,45	1 602 (folyamatos mozgás)	[10]
11	block-on-ring	1Cr18Ni9Ti, ring	196 N	0,45	1 602 (folyamatos mozgás)	[10]
12	block-on-ring	1Cr18Ni9Ti, ring	196 N	0,45	1 602 (folyamatos mozgás)	[10]
13	block-on-ring	1Cr18Ni9Ti, ring	196 N	0,45	1 602 (folyamatos mozgás)	[10]
14	ball-on-disc	440C, ball	5 N	0,10	5 000 (folyamatos mozgás)	[5]
15	ball-on-disc	440C, ball	5 N	0,10	5 000 (folyamatos mozgás)	[5]
16	pin-on-disc	316, disc	6,55 MPa	0,05	nincs adat (folyamatos mozgás)	[6]
17	pin-on-disc	mild steel, disc	1,4 MPa	0,50	nincs adat (folyamatos mozgás)	[7]
18	pin-on-flat	431, flat	6,4 MPa	0,20	5 000 (alternáló mozgás)	[8]
19	pin-on-flat	431, flat	6,4 MPa	0,20	5 000 (alternáló mozgás)	[8]
20	pin-on-flat	431, flat	6,4 MPa	0,20	5 000 (alternáló mozgás)	[8]
21	pin-on-flat	347, flat	6,4 MPa	0,05	1 080 (alternáló mozgás)	[9]
22*	pin-on-flat	304, flat	6,3 MPa	0,05	2 500 (alternáló mozgás)	[3]
23*	pin-on-flat	304, flat	6,3 MPa	0,05	2 500 (alternáló mozgás)	[3]
24*	pin-on-flat	304, flat	6,3 MPa	0,05	2 500 (alternáló mozgás)	[3]
25	pin-on-flat	347, flat	6,4 MPa	0,05	1 080 (alternáló mozgás)	[9]
26	pin-on-flat	347, flat	6,4 MPa	0,05	2 370 (alternáló mozgás)	[9]
27	pin-on-flat	347, flat	6,4 MPa	0,05	30 240 (alternáló mozgás)	[9]
28	block-on-ring	100Cr6, ring	1,0 MPa	1,0	14 400 (folyamatos mozgás)	[11]
29	block-on-ring	100Cr6, ring	1,0 MPa	1,0	14 400 (folyamatos mozgás)	[11]
30	block-on-ring	100Cr6, ring	1,0 MPa	1,0	14 400 (folyamatos mozgás)	[11]
31	block-on-ring	100Cr6, ring	1,0 MPa	1,0	14 400 (folyamatos mozgás)	[11]
32	block-on-ring	100Cr6, ring	1,0 MPa	1,0	14 400 (folyamatos mozgás)	[11]
33	pin-on-flat	304, flat	3,13 MPa	0,10	1 500 (alternáló mozgás)	[4]
34	pin-on-flat	304, flat	3,13 MPa	0,10	20 000 (alternáló mozgás)	[4]
35	pin-on-flat	304, flat	3,13 MPa	0,10	65 000 (alternáló mozgás)	[4]
36	pin-on-flat	304, flat	3,13 MPa	0,10	80 000 (alternáló mozgás)	[4]

\*A 22, 23 és 24-es teszt esetében rendre 2,5, 35 és 68% a relatív páratartalom [3].



1. ábra. Pin-on-flat (a) és block-on-ring (b) konfigurációk sematikus rajza

nem tapasztalható az eredményekben az üveg geometriájának függvényében (1. táblázat). A legújabb kutatások a PTFE kopási sebességének nanorészecskékkel történő csökkentésére irányulnak [3, 4]. A nanorészecskék közül kiemelt eredményt, akár a kopásállóság 3–4 nagyságrendbeli növelését érték el  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , illetve grafén használatával a töltetlen PTFE referencia anyaghoz viszonyítva (1. táblázat). Mindezek mellett, a grafén közel 50%-kal csökkentette a súrlódási tényezőt is [11]. Az 1. táblázatban látható, hogy a grafén koncentrációjának növelésével a kopásállóság javul, egészen 3 nagyságrendig, amit 5, illetve 10 m/m% töltőanyag tartalom mellett érték el [4, 11]. Amennyiben a grafén funkció csoportokat is tartalmaz, az feltételezhetően tovább javíthatja a kopásállóságot [11]. Érdekes jelenség, hogy az  $\text{Al}_2\text{O}_3$  esetében a levegő relatív páratartalma nagymértékben befolyásolja az elért eredményeket. 2,5% páratartalomnál, ugyanazon paraméterek mellett, a kopásállóság két nagyságrenddel növelhető, míg 35 és 68%-nál már a tapasztalt javulás a három nagyságrendet is eléri, illetve meghaladja (1. táblázat) [3]. Azon mérések esetében, ahol a relatív páratartalmat nem szabályozták, ilyen mértékű javulás adott koncentrációk mellett nem látható [9]. Itt meg kell említeni, hogy ezen méréseket (2. táblázat, 22–24. sor) azonos terhelés és sebesség mellett végezték el, hasonlóan a rozsdamentes acél ellendarabnál. A páratartalomtól függő eredményekből a koptatás folyamán végbemenő kémiai reakciókra is következtethetünk.

### 3. AZ ADALÉKANYAGOK KOPÁSCSÖKKENTŐ HATÁSÁNAK KÉMIAI HÁTTERE

A kutatások során a bemutatott jelenségek okainak feltárása érdekében fontos az egyes tribológiai rendszerekben lejátszódó folyamatok mélyebb megismerése. Amennyiben  $\text{Al}_2\text{O}_3$  adalékanyagot alkalmazunk, az 1. táblázatból (22–24. sor) láthatóan a levegő páratartalmának emelkedése hatással van a kopásállóságra, méghozzá növeli azt [3]. Ennek magyarázatához a koptatás folyamán kialakuló tribokémiai reakciókat szükséges tanulmányozni. A PTFE kopása során, a mechanikai igénybevételek hatására a molekulaláncok töredeznék, és

ezáltal szabad láncvégek keletkeznek [11]. Ezen újonnan létrejött láncvégeken a koptatás közben karboxil (COOH) funkció csoportok alakulnak ki a levegőben található páratartalom segítségével [3]. Minél nagyobb számban alakulnak ki ezen karboxil funkció csoportok, annál nagyobb számú kötés kialakítására lesz lehetőség az ellendarab bizonyos atomjaival, illetve adott esetben a PTFE alapanyaghoz hozzáadott adalékokkal [3, 12]. Ahhoz, hogy ezt a jelenséget fel tudjuk használni, a kialakuló átmeneti réteg tartósságának érdekében, mind az ellendarabot, mind a PTFE adalékanyagait kellő körültekintéssel kell kiválasztani. Itt érdemes megjegyezni, hogy található olyan modell is az irodalomban, amely szerint mind a levegő páratartalma, mind az oxigéntartalma szükséges ezen karboxil csoportok létrejöttéhez [12], viszont elérhetőek olyan eredmények is, amelyek közel azonos kopási sebességet közölnek hasonló páratartalom mellett nitrogén ( $\text{N}_2$ ) és nitrogén/oxigén atmoszférában (3. táblázat) [3].

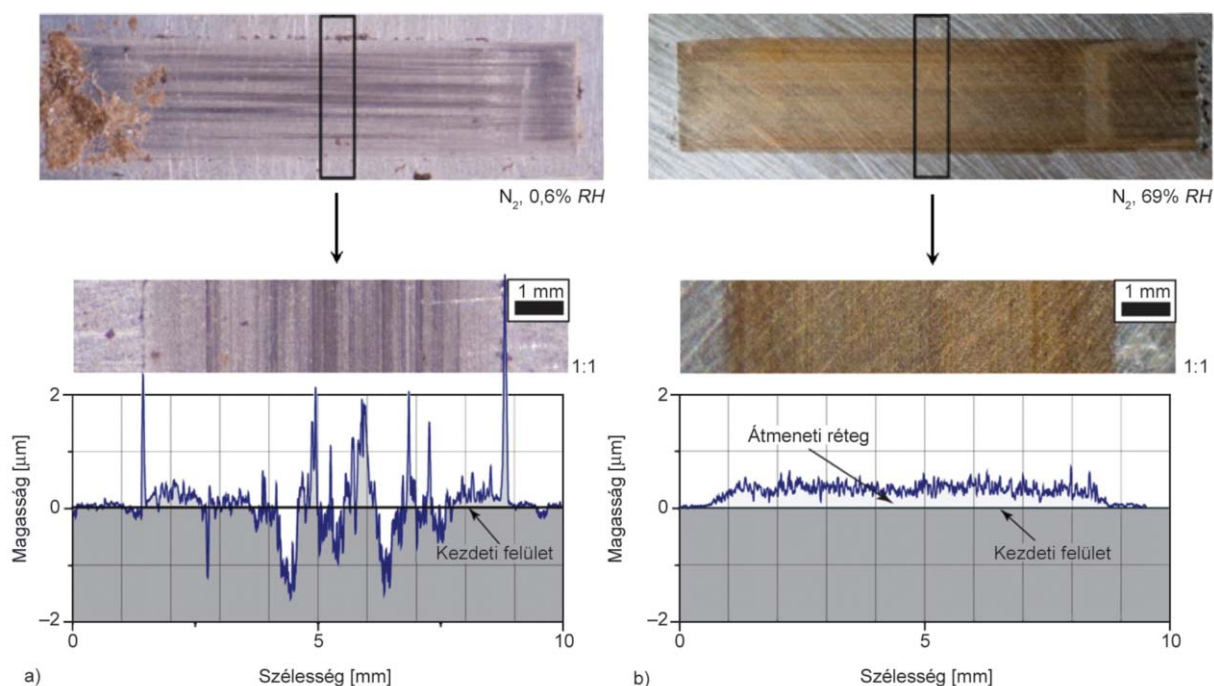
Alumínium-oxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) esetében a PTFE láncvégek koptatás folyamán létrejött karboxil csoportjai komplexet alakítanak ki az alumínium-oxid ionjaival, illetve hasonló komplexet hoznak létre a fém ellendarab atomjaival/ionjaival is [3, 12]. Ezen adalékanyag hatására megfelelő körülmények között

3. táblázat.

PTFE/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  kompozit (5 m/m%) kopási sebessége azonos körülmények között nitrogén és nitrogén/oxigén (80/20) atmoszférában [3]

Atmoszféra	Relatív páratartalom [%]	Kopási sebesség [ $\text{mm}^3/\text{Nm}$ ]
Vákuum	~0	$3,5 \cdot 10^{-5}$
$\text{N}_2$	0,5	$1,4 \cdot 10^{-6}$
$\text{N}_2 + \text{O}_2$ (80/20)	2,5	$4,4 \cdot 10^{-6}$
$\text{N}_2$	30	$2,6 \cdot 10^{-7}$
$\text{N}_2 + \text{O}_2$ (80/20)	35	$5,6 \cdot 10^{-7}$
$\text{N}_2$	69	$1,0 \cdot 10^{-7}$
$\text{N}_2 + \text{O}_2$ (80/20)	68	$2,4 \cdot 10^{-7}$





2. ábra. PTFE/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  kompozit kopási felülete és átmeneti rétege 0,6% (a) és 69% (b) relatív páratartalom (RH%) mellett nitrogén atmoszférában [3]

létrejött kémiai kötések a kialakuló átmeneti réteget egyenletesebb minőségűvé és tartósabbá tették, javítva ezzel a tribológiai teljesítményt. A PTFE/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  kompozitok (5 m/m%) átmeneti rétegét a nitrogén atmoszféra páratartalmának függvényében a 2. ábra mutatja be [3]. A 2a. ábra mintáját 0,6%, míg a 2b. ábrát 69% páratartalom mellett koptatták. A 0,6% páratartalomban végzett koptatás során jelentős kopadék keletkezett, míg 69% páratartalomnál az ábrán is látható tartós átmeneti réteg képződött, csökkentve ezzel a kopadék mennyiségét. A kompozitok kopási sebessége  $7 \cdot 10^{-6}$  (2a. ábra), illetve  $1 \cdot 10^{-7} \text{ mm}^3/\text{Nm}$  (2b. ábra) [3]. Grafén adalékanyag esetében felmerülő kérdés az esetlegesen jelen levő funkcionális csoportok hatása a kopási sebességre. Amennyiben a grafén tartalmaz funkcionális csoportokat (funkcionalizált grafén) a kopás csökkenés a grafénen található hidroxil (OH), karboxil (COOH) és epoxi funkcionális csoportok közreműködésével tovább fokozható. A funkcionizált grafén ezen funkcionális csoportjai képesek reakcióba lépni a PTFE láncvégeken található karboxil csoportokkal, illetve a fém ellendarab bizonyos atomjaival/ ionjaival [4, 11]. A fém ellendarab atomjai közül például a nikkelről feltételezik, hogy képes reakcióba lépni mind az említett funkcionális csoportokkal, mind a PTFE láncvégek karboxil csoportjaival [6]. A funkcionális csoportok pozitív hatását PTFE/ szén nanocső kompozitok esetében is kimutatták. A funkcionizált nanocsövek két nagyságrenddel kisebb kopási sebességet eredményeztek, mint a funkcionális csoportokkal nem rendelkező változat [2].

A PTFE láncvégeken a kopás következményeként kialakuló új funkcionális csoportokat és kötésekét röntgen fotoelektron spektroszkópia (XPS), illetve Fourier-transzformációs infravörös spektroszkópia (FTIR) vizsgálatokkal is igazolták [3, 11].

#### 4. ÖSSZEFOGLALÁS

A PTFE, előnyös tulajdonságainak köszönhetően, a tribológia egyik széleskörűen felhasznált anyaga. A gyakorlatban történő alkalmazásához azonban a legtöbb esetben szükséges a kopásállóságának növelése. Erre igen elterjedt módszer a különböző mikro- és nanorészecskék hozzáadása, amelyekkel kopásállósága több nagyságrenddel is javítható. Ahhoz azonban, hogy ezen a területen igazán számottevő eredményeket lehessen elérni, az adalékanyagok megválasztásához szükséges a koptatás folyamán lejátszódó tribokémiai jelenségek mélyebb szintű megismerése. Amennyiben ezen kémiai háttértudás ismeretében választunk adalékanyagokat, akkor a felhasznált adalékanyagok és a PTFE, illetve az alkalmazott fém ellendarab között további, a kopás csökkenését segítő folyamatok mehetnek végbe. Ehhez azonban szükséges a fém ellendarab és a mérési körülmények helyes kiválasztása/beállítása is. A kisebb kopási sebesség nagyobb élettartamot biztosít, ami a karbantartási költségek csökkenését eredményezi a felhasználó számára.

A cikk a Magyar Tudományos Akadémia Bolyai János Kutatási Ösztöndíj támogatásával készült.

#### IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Dubey, M. K.; Bijwe, J.; Ramakumar, S. S. V.: PTFE based nanolubricants, *Wear*, 306, 80–88 (2013).
- [2] Makowiec, M. E.; Blanchet, T. A.: Improved wear resistance of nanotube- and other carbon-filled PTFE composites, *Wear*, 374–375, 77–85 (2017).
- [3] Krick, B. A.; Ewin, J. J.; Blackman, G. S.; Junk, C. P.; Sawyer, W. G.: Environmental dependence of ultra-low wear behavior of polytetrafluoroethylene (PTFE) and alumina composites

- suggests tribochemical mechanisms, *Tribology International*, 51, 42–46 (2012).
- [4] Kandanur, S. S.; Rafiee, M. A.; Yavari, F.; Schrameyer, M.; Yu, Z.; Blanchet, T. A.; Koratkar, N.: Suppression of wear in graphene polymer composites, *Carbon*, 50, 3178–3183 (2012).
  - [5] Khedkar, J.; Negulescu, I.; Meletis, E. I.: Sliding wear behavior of PTFE composites, *Wear*, 252, 361–369 (2002).
  - [6] Blanchet, T. A.; Kennedy, F. E.: Sliding wear mechanism of polytetrafluoroethylene (PTFE) and PTFE composites, *Wear*, 153, 229–243 (1992).
  - [7] Tanaka, K.; Kawakami, S.: Effect of various fillers on the friction and wear of polytetrafluoroethylene-based composites, *Wear*, 79, 221–234 (1982).
  - [8] Klaas, N. V.; Marcus, K.; Kellock, C.: The tribological behaviour of glass filled polytetrafluoroethylene, *Tribology International*, 38, 824–833 (2005).
  - [9] Sawyer, W. G.; Freudenberg, K. D.; Bhimaraj, P.; Schadler, L. S.: A study on the friction and wear behavior of PTFE filled with alumina nanoparticles, *Wear*, 254, 573–580 (2003).
  - [10] Li, F.; Yan, F.; Yu, L.; Liu, W.: The tribological behaviors of copper-coated graphite filled PTFE composites, *Wear*, 237, 33–38 (2000).
  - [11] Padenko, E.; Van Rooyen, L. J.; Wetzels, B.; Karger-Kocsis, J.: ‘Ultralow’ sliding wear polytetrafluoroethylene nanocomposites with functionalized graphene, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 35, 892–901 (2016).
  - [12] Harris, K. L.; Pitenis, A. A.; Sawyer, W. G.; Krick, B. A.; Blackman, G. S.; Kasprzak, D. J.; Junk, C. P.: PTFE tribology and the role of mechanochemistry in the development of protective surface films, *Macromolecules*, 48, 3739–3745 (2015).